中国生态农业学报 2016年7月 第24卷 第7期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2016, 24(7): 910−917

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160121

蚕豆根分泌物对紫色土有效养分及微生物数量的影响*

袁秀梅 耿赛男 郑梦圆 习向银** 宋大利 黄伏森

(西南大学资源环境学院 重庆 400715)

摘 要 为培育紫色土肥力和合理利用蚕豆资源，本研究首先通过溶液培养法收集到蚕豆根系分泌物后，并通过真空旋转蒸发仪得到浓缩液，然后通过室内土壤培养试验，即分别在3种60 g紫色土(酸性紫色土、碱性紫色土和中性紫色土)添加2个水平[6 mL(低量)和12 mL(高量)]的蚕豆根系分泌物浓缩液，并置于25 ℃恒温箱中黑暗培养15 d，从而探索蚕豆根系分泌物对不同紫色土有效养分和微生物数量的影响。结果表明：在3种紫色土上，与对照相比，添加低量和高量蚕豆根系分泌物浓缩液后，土壤碱解氮含量和pH均显著降低；而土壤有效磷、速效钾、有效铁、有效锌含量和微生物数量均显著增加，且此趋势随根系分泌物浓缩液添加量增加而增强。与其他两种紫色土相比，酸性紫色土添加蚕豆根系分泌物浓缩液对于土壤碱解氮含量和pH的降低效应最明显，对土壤中细菌和真菌数量增加效应更为显著，与对照相比，增幅分别为−32.00%、−4.51%、3.51倍和9.00倍。与其他两种紫色土相比，碱性紫色土添加高量蚕豆根系分泌物浓缩液对土壤有效磷、速效钾、有效锌和有效铁含量活化效应最强，分别是对照的4.48倍、2.04倍、147.10%和128.00%。在中性紫色土上，添加高量蚕豆根系分泌物浓缩液对以上土壤有效养分和土壤微生物数量的影响介于酸性紫色土和碱性紫色土之间。总之，蚕豆根系分泌物对不同紫色土土壤有效养分(土壤碱解氮和pH除外)和土壤微生物活性有不同促进效应，这对于紫色土肥力培育有深远影响。

关键词 蚕豆 紫色土 根系分泌物 有效养分 微生物数量
中图分类号: Q945.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)07-0910-08

Effects of faba bean (*Vicia faba* L.) root exudate on soil available nutrients and microbial population in different purple soils*

YUAN Xiumei, GENG Sainan, ZHENG Mengyuan, XI Xiangyin**, SONG Dali, HUANG Fusen
(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract In order to improve the fertility of purple soil and make reasonable use of faba bean, this study collected faba bean root exudates by solution cultivation and obtained the concentrated solution by vacuum rotary evaporator. Then a soil cultivation experiment was carried out with 2 levels (low level of 6 mL and high level of 12 mL) of concentrated solutions of faba bean root exudates added separately to three types of 60 g purple soils (acid purple soil, alkaline purple soil and neutral purple soil) in constant temperature box. The aim of the study was to determine the effects of faba bean root exudates on soil available nutrients and microbial population in different purple soils. The results showed that compared with the control, both alkali-hydrolysable N and pH decreased significantly while available P, K, Zn and Fe along with microbial population increased significantly in the three types of purple soil after adding concentrated solutions of faba bean root exudates to the soil. Moreover, the above trends increased with increasing level of the root extrudates. The decreasing effects of high amount

* 国家自然科学基金项目(40801109)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2011B007)和西南大学资源环境学院"光炯"科技创新项目(2014)资助
** 通讯作者：习向银，主要从事植物营养与资源利用的研究。E-mail: xixiangyin@126.com
袁秀梅，主要从事绿肥对土壤理化性质改良的研究。E-mail: xiumeiyuan2013@163.com
收稿日期: 2016−01−31 接受日期: 2016−02−29

* The study were supported by the National Natural Science Foundation of China (40801109), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (XDJK2011B007) and the Guangjiong Scientific and Technological Innovation Foundation of College of Resources and Environment, Southwest University.
** Corresponding author, E-mail: xixiangyin@126.com
Received Jan. 31, 2016; accepted Feb. 29, 2016

of faba bean root exudates on soil alkali-hydrolysable N and pH were most obvious in acid purple soil compared with in alkali and neutral purple soils. However, the most significant increasing effect on soil bacteria and fungi amounts was also observed in acid purple soils. The above four indicators in acid purple soils with high level faba bean root exudates addition were respectively 68.00%, 95.49%, 4.51 times and 10.00 times those of the control. In alkali purple soils, the addition of high amount of concentrated faba bean root exudates showed most significantly increasing effects on soil available P, K, Zn and Fe contents, which were 4.48 times, 2.04 times, 147.00% and 128.00% of those of the control, respectively. In conclusion, there were different effects on soil available nutrients and soil microbial activity after faba bean root exudates addition to different types of purple soils. This had a profound effect on the fertility of cultivated purple soils in the study area.
Keywords　Faba bean; Purple soil; Root exudate; Available nutrient; Microbial population

紫色土是亚热带和热带季风气候条件下由紫色岩风化发育而成的一种非地带性土壤，集中分布在四川盆地丘陵区和海拔 800 m 以下的低山区，是四川省仅次于水稻土居于第二位的耕作土地。其中，碱性紫色土的分布面积达 400 万 hm^2 以上，中性紫色土分布面积达 266 万 hm^2 以上，酸性紫色土分布面积达 200 万 hm^2 以上。紫色土矿质养分丰富，在四川盆地丘陵地区为较肥沃土壤，农业利用价值很高。但由于紫色土结构疏松，易于风化，水土流失严重，48.8%的紫色土受到土壤侵蚀的危害[1]。加上人口增长和耕地面积急剧减少，耕地质量遭受严重破坏，越来越变得贫瘠而耕作困难，甚至出现土壤板结硬化，耕作层变浅[2]，保水保肥功能下降等现象，粮食综合生产能力每况愈下。因此，改良紫色土，培育紫色土肥力，提高耕地质量已成为紫色土可持续发展的迫切要求[2]。

根系分泌物是植物在生长过程中通过根系向外界分泌的物质，主要是一些低分子和高分子有机化合物[3–4]。是植物与土壤进行物质、能量、信息交流的重要媒介，也是根际微生态系统中的有机枢纽。它不仅是保持根际微生态系统活力的关键因素，也是根际微生态系统中物质迁移和调控的重要组成部分[5]。已有研究表明，根系分泌物能活化土壤中的磷[6–7]，促进氮素从无机向有机的转化[8]，并且对土壤中速效钾[9]、有效铁[10]、有效锌[11]等有很好的活化效应。土壤微生物是土壤的重要组成部分，大部分土壤中的生物化学转化过程都是由微生物的活动引起的[12]，能客观地反映土壤肥力状况，是土壤肥力的重要指标之一[13]，根系分泌物能为土壤微生物提供大量的营养和能源物质及丰富的碳、氮源，显著促进土壤微生物活动[14–15]，进而对微生物的种类、数量和分布产生重要影响。

蚕豆(*Vicia faba*)是一种重要经济作物，也是一种绿肥，目前我国蚕豆的种植面积位居世界第一，尤其在四川、重庆等地分布广泛[16–17]。目前关于蚕豆的研究涉及蚕豆根系分泌物对土传病害的防治[18]、蚕豆作为绿肥对土壤改良的作用[19–20]，以及蚕豆/小麦(*Triticum aestivum*)[21]和蚕豆–玉米(*Zea mays*)[22]间作模式中作物产量和养分吸收等方面。而关于蚕豆根系分泌物对土壤肥力影响的研究很少。因此，本试验拟通过土壤培养试验探索蚕豆根系分泌物对不同紫色土肥力的影响，为紫色土肥力培育和蚕豆资源利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试蚕豆购自河南华丰草业科技有限公司。供试土壤包括酸性、碱性和中性 3 种紫色土。酸性紫色土采自重庆市江津区四面山镇燕子村，碱性紫色土采自重庆市潼南县双江镇双江村，中性紫色土采自重庆市合川区大石镇观龙村。土壤采样采用多点混合法，均采集耕层土壤，然后风干备用，其基本理化性质见表 1。试验于 2014 年 3—6 月在西南大学植物营养系实验室进行。

表 1　试验用 3 种紫色土的基本化学成分

Table 1　Basic chemical compositions of three types of purple soils used in the experiment

紫色土类型 Type of purple soil	碱解氮 Available N ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效磷 Available P ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available K ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效铁 Available Fe ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效锌 Available Zn ($mg\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total N ($g\cdot kg^{-1}$)	全磷 Total P ($g\cdot kg^{-1}$)	全钾 Total K ($g\cdot kg^{-1}$)	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	pH
酸性紫色土 Acid purple soil	62.52	11.71	14.52	2.35	1.00	0.64	0.47	11.80	15.11	5.50
碱性紫色土 Alkaline purple soil	53.63	3.35	20.09	0.71	0.69	0.85	0.77	21.12	13.76	8.64
中性紫色土 Neutral purple soil	71.08	11.19	50.23	2.22	1.41	0.88	0.85	15.31	10.28	7.44

1.2 试验方法

1.2.1 蚕豆根系分泌物收集

选出大小一致且饱满的蚕豆种子，15% H_2O_2浸泡 15 min，用去离子水清洗干净后将种子均匀撒在装有湿润石英砂的托盘中，用湿润滤纸覆盖，置于25 ℃黑暗培养室中发芽，出芽后正常光照下培养，待长到 3 片叶后，将其拔出，用去离子水反复冲洗掉附着在根上面的石英砂，移入 1/2 营养液中培养 1 周后移入全营养液中培养。所用盆钵体积为 2 L，每盆钵种植蚕豆 15 株，共种植 10 盆。每 3 d 更换一次营养液，每天通气和光照 12 h (8:30—20:30)。所用营养液配方($mol \cdot L^{-1}$)为：K_2SO_4 0.75×10^{-3}；KCl 0.1×10^{-3}；KH_2PO_4 0.25×10^{-3}；$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ 5.0×10^{-9}；$Ca(NO_3)_2$ 2.0×10^{-3}；$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.6×10^{-3}；H_3BO_3 1.0×10^{-5}；$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 5.0×10^{-7}；$MnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1.0×10^{-6}；Fe-EDTA 1.0×10^{-4}；$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 1.0×10^{-6}。

移栽后 40 d 时收集蚕豆根系分泌物，具体收集方法为[17,23–24]：先光照 2 h 后，将每盆中 15 株蚕豆植株从培养溶液中取出，并用去离子水冲洗根系 4 次，将根系转至盛有 450 mL 去离子水的 1 L 烧杯中，并保证根部处于避光条件下收集分泌物 4 h，将 10 盆收集的根系分泌物合并，并在真空 40 ℃下浓缩 40 倍，最后得到 150 株蚕豆根系分泌物的浓缩液，即每0.75 mL 蚕豆根系分泌物浓缩液相当于单株蚕豆 4 h 的根系分泌量，并立即贮于冰箱冷冻室–20 ℃备用。

1.2.2 土壤培养试验

参照孙磊等[24]的方法进行土壤培养试验。蚕豆根系分泌物设2个水平，高量：12 mL根系分泌物；低量：6 mL根系分泌物加6 mL去离子水；以12 mL去离子为对照(CK)。取风干过80目筛的酸性、碱性、中性紫色土60 g置于100 mL烧杯中。将上述溶液均匀地点滴入酸性、中性、碱性紫色土中，使土壤湿度保持在田间持水量的80%左右，每个处理重复4次，置于25 ℃恒温箱中黑暗培养15 d。每天利用称重法和中性去离子水补足缺失的水分。待培养结束时，每个处理每个重复的60 g土全部取出，并按测定指标的标准方法分别制样待用。

1.3 测定指标及方法

土壤碱解氮测定采用扩散法，土壤速效钾测定采用NH_4Ac-火焰光度法，土壤有效磷测定采用Olsen法，土壤有效锌和有效铁测定采用DTPA浸提–原子吸收分光光度法，土壤pH采用水浸提法和pH计测量[25]。

土壤微生物数量：细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基，平板菌落计数法测定；放线菌采用改良高氏1号培养基，平板菌落计数法测定；真菌采用马丁氏孟加拉链霉素培养基。平板菌落计数法测定[26]。

1.4 数据处理

采用SPSS 18.0和Microsoft Excel 2007软件对实验数据进行单因素方差分析和数据均值及标准差分析。

2 结果与分析

2.1 蚕豆根系分泌物对紫色土养分含量的影响

由表2可知，与对照相比，在酸性、碱性和中性紫色土加入6 mL和12 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，土壤碱解氮含量均显著降低，且土壤碱解氮降幅随根系分泌物浓缩液量增加而增加。对于酸性紫色土而言，加入蚕豆12 mL和6 mL的根系分泌物浓缩液后，土壤碱解氮分别较对照降低32.00%、24.40%；对于碱性紫色土而言，对应降幅依次为6.00%、2.50%；对于中性紫色土而言，对应降幅依次为25.40%、12.50%。可见，蚕豆根系分泌物对酸性紫色土碱解氮降低效应最为明显。

表 2 蚕豆根系分泌物对 3 种紫色土养分含量的影响
Table 2 Effects of root exudates of faba bean on nutrients contents of three types of purple soil

项目 Item	根系分泌物量 Root exudates amount (mL)	酸性紫色土 Acid purple soil	碱性紫色土 Alkaline purple soil	中性紫色土 Neutral purple soil
碱解氮 Alkali-hydrolysable N ($mg \cdot kg^{-1}$)	12	87.54±1.54c	92.43±0.83c	95.98±1.94c
	6	97.39±4.85b	95.86±1.44b	112.55±9.35b
	0	128.75±0.82a	98.36±0.66a	128.65±0.74a
速效磷 Available P ($mg \cdot kg^{-1}$)	12	43.69±3.84a	25.83±3.13a	48.19±4.72a
	6	37.40±1.23b	17.67±3.87b	39.93±0.87b
	0	32.88±0.24b	5.76±1.05c	32.38±1.17c
速效钾 Available K ($mg \cdot kg^{-1}$)	12	27.55±5.51a	43.74±2.07a	85.30±3.59a
	6	20.73±2.38b	33.47±2.36b	72.05±2.12b
	0	14.68±0.40b	21.42±1.35c	52.55±2.26c
有效铁 Available Fe ($mg \cdot kg^{-1}$)	12	2.74±0.04a	0.96±0.13a	2.64±0.07a
	6	2.63±0.06a	0.83±0.01ab	2.41±0.21ab
	0	2.38±0.10b	0.75±0.10b	2.25±0.04b
有效锌 Available Zn ($mg \cdot kg^{-1}$)	12	1.11±0.06a	1.03±0.27a	1.78±0.04a
	6	1.10±0.07a	0.75±0.03ab	1.68±0.01b
	0	1.04±0.03a	0.70±0.02b	1.51±0.01c

表中数据为 4 次重复平均值；同列不同字母表示处理间达 5%显著水平。所用根系分泌物为蚕豆根系分泌物，即每 0.75 mL 蚕豆根系分泌物浓缩液相当于单株蚕豆 4 h 的根系分泌量。下同。Data was average of four replicates. Different letters in the same column indicated significant difference at 5% level. 0.75 mL root exudates of faba bean used in the experiment was root exudates of one faba bean plant secreting for 4 hours. The same below.

与对照相比，在碱性紫色土和中性紫色土上加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后土壤有

效磷均显著增加，且增幅有随根系分泌物浓缩液量增加而递增的趋势。在酸性紫色土上，与对照相比，仅加入12 mL根系分泌物浓缩液后土壤有效磷含量显著增加，加入6 mL根系分泌物浓缩液与对照之间没有差异。对于酸性紫色土而言，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，土壤有效磷含量依次是对照的1.33倍、1.14倍；同样地，对于碱性紫色土而言，依次是对照的4.48倍、3.06倍；对于中性紫色土而言，依次是对照的1.49倍、1.24倍。可见，蚕豆根系分泌物对碱性紫色土的有效磷活化效应最强。

与对照相比，在碱性紫色土和中性紫色土上加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后土壤速效钾含量均显著增加，且增幅有随根系分泌物浓缩液量增加而递增的趋势。在酸性紫色土上，与对照相比，仅加入12 mL根系分泌物浓缩液后土壤速效钾含量显著增加，而加入6 mL根系分泌物浓缩液与对照之间没有显著差异。其中，对于酸性紫色土而言，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，土壤速效钾含量依次是对照的1.88倍、1.41倍；同样地，对于碱性紫色土而言，依次是对照的2.04倍、1.56倍；对于中性紫色土而言，依次是对照的1.62倍、1.37倍。可见，蚕豆根系分泌物对碱性紫色土的速效钾活化效应最强。

在酸性紫色土上，加入蚕豆12 mL和6 mL根系分泌物浓缩液后，有效铁含量均显著高于对照；在碱性紫色土和中性紫色土上，仅加入12 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，有效铁含量显著高于对照，而加入6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液与对照无显著差异。可见，在3种紫色土上，加入12 mL根系分泌物浓缩液对土壤有效铁都有很好的活化效应。加入12 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，与对照相比，有效铁含量增幅在酸性紫色土为15.60%，在碱性紫色土为28.00%，在中性紫色土为17.30%。可见，加入高量蚕豆根系分泌物对碱性紫色土的有效铁活化效应最强。在酸性紫色土上，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，两者的有效锌含量与对照均无显著差异；在碱性紫色土上，加入12 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，有效锌含量显著高于对照；在中性紫色土上，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，有效锌含量均显著高于对照。加入12 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，与对照相比，有效锌含量增幅在酸性紫色土为6.73%，在碱性紫色土为47.10%，在中性紫色土为17.90%。可见，加入高量蚕豆根系分泌物对碱性紫色土的有效锌活化效应最强。

2.2　蚕豆根系分泌物对紫色土 pH 的影响

由表3可知，在碱性紫色土和中性紫色土上，与对照相比，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后土壤pH均显著降低，且降幅有随根系分泌物浓缩液量增加而递增的趋势。在酸性紫色土上，与对照相比，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后土壤pH均显著降低，而两种用量根系分泌物浓缩液之间没有差异。其中，对于酸性紫色土而言，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，土壤pH降幅依次是对照的4.51%、3.25%；同样地，对于碱性紫色土而言，降幅依次是对照的1.73%、0.58%；对于中性紫色土而言，降幅依次是对照的3.21%、1.20%。可见，蚕豆根系分泌物对酸性紫色土的土壤pH降幅最大。

表 3　蚕豆根系分泌物对 3 种紫色土 pH 的影响
Table 3　Effects of root exudates of faba bean on pH of three types of purple soil

根系分泌物量 Root exudates amount (mL)	酸性紫色土 Acid purple soil	碱性紫色土 Alkaline purple soil	中性紫色土 Neutral purple soil
12	5.29±0.01b	8.53±0.02c	7.24±0.06c
6	5.36±0.05b	8.63±0.02b	7.39±0.01b
0	5.54±0.09a	8.68±0.02a	7.48±0.02a

2.3　蚕豆根系分泌物对紫色土微生物数量的影响

如表4所示，在酸性紫色土上，与对照相比，仅加入12 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，细菌和真菌数量显著增加，增加幅度依次是对照的4.51倍和10.00倍，而放线菌没有显著差异；在碱性紫色土上，与对照相比，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，细菌、真菌和放线菌数量均显著增加，12 mL根系分泌物浓缩液处理增加幅度依次是对照的2.22

表 4　蚕豆根系分泌物对 3 种紫色土微生物数量的影响
Table 4　Effects of root exudates of faba bean on microbe quantity of three types of purple soil　$\times10^5$ cfu·g^{-1}

微生物 Microbe	根系分泌物量 Root exudates amount (mL)	酸性紫色土 Acid purple soil	碱性紫色土 Alkaline purple soil	中性紫色土 Neutral purple soil
细菌 Bacteria	12	37.42±6.89a	14.16±1.40a	42.06±3.80a
	6	13.59±4.36b	9.41±0.56b	25.74±3.38b
	0	8.29±2.11b	6.39±0.20c	11.72±0.54c
真菌 Fungi	12	0.10±0.05a	0.04±0.00a	0.10±0.03a
	6	0.03±0.01b	0.02±0.01b	0.06±0.02b
	0	0.01±0.01b	0.01±0.00c	0.02±0.00c
放线菌 Actinomyces	12	1.10±0.11a	1.68±0.05a	2.23±0.26a
	6	0.79±0.33a	1.40±0.03b	2.21±0.14a
	0	0.66±0.17a	0.83±0.06c	1.91±0.07a

倍、4.00倍、2.02倍；在中性紫色土上，与对照相比，加入12 mL和6 mL蚕豆根系分泌物浓缩液后，细菌和真菌均显著增加，12 mL根系分泌物浓缩液处理增加幅度依次是对照的3.59倍和5.00倍，但对放线菌数量没有显著影响。可见，加入高量蚕豆根系分泌物对酸性紫色土的细菌和真菌数量有最明显的增加效应。

3 讨论和结论

植物根系在生长过程中，会向根基周围分泌一些低分子的有机酸、氨基酸等有机化合物，称之为根系分泌物[3–4]。根系分泌物对土壤中矿质养分转化和微生物活动起着重要作用。本研究中，土壤中加入蚕豆根系分泌物后，土壤碱解氮含量显著降低，这与前人[8,14]的研究结果类似。这可能是因为加入蚕豆根系分泌物后促进了土壤微生物繁殖，而微生物代谢活动增加了对无机氮的需求，从而显著降低了土壤中碱解氮的含量[8,14]；另一个原因可能是根系分泌物降低了土壤中脲酶的活性，土壤脲酶是催化土壤有机态氮转化为无机态氮的酶类，它与土壤氮素养分具有显著正相关性[27–28]。本研究还表明，蚕豆根系分泌物对酸性紫色土的碱解氮降低幅度最大，这可能与酸性紫色土的低土壤pH和活跃的微生物活动，以及土壤脲酶较低有关。

植物根系分泌物对提高土壤磷素的生物有效性具有非常重要的作用。本研究表明，与对照相比，加入蚕豆根系分泌物后，土壤中有效磷含量增加，并且随根系分泌物量增加而增加，说明蚕豆根系分泌物有利于土壤难溶性磷的活化效应，如Li等[29]在研究蚕豆与玉米间套作时发现蚕豆根系会通过释放有机酸和质子来酸化土壤，活化土壤难溶性磷，促进玉米对磷的吸收利用；其他植物根系分泌物对磷的影响也得出了类似结果[30–32]。蚕豆根系分泌物之所以提高了土壤有效磷的含量，其一可能因为其含有大量低分子有机酸[18,33]，能降低土壤pH[34]，提高土壤难溶性磷化合物的溶解度；其次磷可与土壤中的Al^{3+}、Fe^{3+}和Ca^{2+}等形成螯合物，这不仅提高了Al-P、Fe-P和Ca-P复合体中阳离子的有效性[35]，而且促进了磷的释放，使根际土壤中难溶性磷转变为可利用的磷，从而提高磷的有效性[35]；再次根系分泌物可能提高了土壤磷酸酶活性，磷酸酶活性高反映了土壤速效磷的供应状况好[28]。本研究还表明，蚕豆根系分泌物对碱性紫色土有效磷含量的增加效应最强。这可能与碱性紫色土中含有较高含量的难溶性磷化合物(如Ca-P等)有关，具体原因还有待进一步研究。

与土壤中的氮、磷相比，土壤中钾素含量更为丰富。可以说，土壤是一个巨大的天然钾库，但土壤中的速效钾含量却不高，仅占全钾的0.1%~2%，缓效钾含量也只占全钾的2%~8%，而作物难利用的矿物态钾占土壤钾的90%~98%。本研究表明，加入蚕豆根系分泌物后，土壤中速效钾含量明显高于对照，这和前人[36]结果类似。这主要可能是由于根系分泌物中含有大量的有机酸[18,37]，有机酸中解离的H^+，既可以通过酸溶作用促进难溶性矿物的溶解，又可以形成水合氢离子，而其大小与钾离子相似，因此可取代矿物晶格中的钾，从而使K^+释出[37]。此外，有机酸中邻位带羧基和羟基的小分子有机酸，容易与矿物结构中的金属离子形成金属–有机复合体，从而加速矿物的分解[37]。总之，低分子量有机酸可有效地促进矿物钾的分解释放，其可能机制为络合溶解和酸性水解双重作用的结果。其中，草酸具有较强的络合能力和水解能力，活化矿物钾的能力大于其他有机酸；柠檬酸、苹果酸、酒石酸等多元酸，络合能力强，但其水解能力较弱，主要是通过络合溶解作用活化矿物钾；乳酸、乙酸等一元酸，络合能力低，水解能力较弱，活化矿物钾的能力很低。本文研究还表明，蚕豆根系分泌物对于碱性紫色土有更好的活化效应，可能是因为碱性紫色土里含有较多的矿物钾，另外与碱性紫色土中含有较高的全钾含量也有一定关系，具体原因有待进一步验证。

石灰性土壤中作物常出现Fe、Zn等微量元素的缺乏现象，这对作物生长发育造成很大影响。这种情况的发生与土壤pH、土壤碳酸钙含量、土壤含水量等多种因素有关。本研究表明，加入蚕豆根系分泌物后，土壤pH有所降低，而有效铁和有效锌含量均有所提高，这与左元梅等[10]和胡学玉[11]等的研究结果类似。较低土壤pH意味着土壤溶液中有较多的H^+，进而能够使土壤表面的Fe、Zn等金属离子被H^+置换下来[38–40]。同时，根系分泌物对锌和铁有相似的螯溶能力，根系分泌物中的某些物质对铁和锌的活化主要是通过络合作用来实现的[39]。此外，根系分泌物通过与Ca^{2+}形成较为稳定的配合物，降低土壤中Ca^{2+}的浓度，以减少含钙化合物对锌的吸附固定，从而使土壤中锌素得以释放[39]。本研究还表明，高量蚕豆根系分泌物更有利于碱性紫色土有效锌和有效铁的活化效应，这可能与碱性紫色土存在较多易被根系分泌物络合的铁锌形态有关，具体原因有待进一步研究。

土壤微生物在有机质降解、无机物转化、氮固

定、植物营养和土壤肥力保持方面具有重要作用, 对维持土壤生态系统平衡意义重大。许多研究表明土壤中真菌、细菌和放线菌3大类微生物的数量是评价土壤肥力高低的重要生物学指标[13,41]。本研究表明, 添加蚕豆根系分泌物提高了土壤真菌、细菌和放线菌数量, 这与刘纯和赵小亮等[23,42–43]的研究结果一致, 原因是根系分泌物中丰富的糖类、氨基酸及维生素等为土壤微生物的生长和繁殖提供了充足的营养; 而杨阳等[44]在研究分蘖洋葱根系分泌物对土壤微生物的影响指出, 分蘖洋葱根系分泌物处理增加了土壤细菌、放线菌数量, 降低了真菌数量, 这可能是因为所用的根系分泌物来源不同或者是试验所用土壤不同。本研究还表明, 高量蚕豆根系分泌物对酸性紫色土细菌和真菌数量增加效应最为明显, 这可能与酸性紫色土有适宜微生物繁殖的土壤pH环境有关。

综上所述, 添加蚕豆根系分泌物浓缩液降低了土壤碱解氮含量和土壤 pH, 提高了有效磷、有效钾、有效铁、有效锌含量及增加了土壤真菌、细菌、放线菌数量; 高量蚕豆根系分泌物对土壤有效养分和微生物数量有显著的增加效应, 但增加效应因紫色土类型不同而异。因此, 种植蚕豆可活化紫色土不易被利用的磷、钾、铁、锌, 并提高紫色土微生物活性。本研究还表明, 碱性紫色土上, 蚕豆根系分泌物对土壤有效磷、有效钾、有效锌和有效铁的活化效应最为明显。本研究结果为紫色土肥力培育和蚕豆合理利用提供了重要的科学依据。本文采用溶液培养法收集的根系分泌物来初步探索蚕豆根系分泌物对紫色土养分活化的影响, 这些数据与土壤培养和田间条件下可能会有些差异, 因此本研究结果还有待进一步验证。

参考文献 References

[1] 林超文, 涂仕华, 黄晶晶, 等. 植物篱对紫色土区坡耕地水土流失及土壤肥力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2190–2198
Lin C W, Tu S H, Huang J J, et al. The effects of plant hedgerows on soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple soil area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2190–2198

[2] 朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 743–749
Zhu B, Chen S, You X, et al. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(5): 743–749

[3] 张豆豆, 梁新华, 王俊. 植物根系分泌物研究综述[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 314–320
Zhang D D, Liang X H, Wang J. A review of plant root exudates[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(35): 314–320

[4] Dijkstra F A, Cheng W X. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition[J]. Ecology Letters, 2007, 10(11): 1046–1053

[5] 张福锁, 申建波, 冯固. 根际生态学——过程与调控[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 158–163
Zhang F S, Shen J B, Feng G. Rhizosphere Ecology: Process and Regulation[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 158–163

[6] Paul G C, Bokhtiar S M, Islam M J. Contribution of different green manuring to phosphate nutrition of sugarcane[J]. Bangladesh Journal of Sugarcane, 1999, 21: 76–80

[7] Shen H, Yan X L, Zhao M, et al. Exudation of organic acids in common bean as related to mobilization of aluminum- and iron-bound phosphates[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 48(1): 1–9

[8] Landi L, Valori F, Ascher J, et al. Root exudate effects on the bacterial communities, CO_2 evolution, nitrogen transformations and ATP content of rhizosphere and bulk soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(3): 509–516

[9] 李廷轩, 马国瑞, 张锡洲. 富钾基因型籽粒苋主要根系分泌物及其对土壤矿物态钾的活化作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 368–372
Li T X, Ma G R, Zhang X Z. Root exudates of potassium-enrichment genotype grain amaranth and their activation on soil mineral potassium[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 368–372

[10] 左元梅, 陈清, 张福锁. 利用 ^{14}C 示踪研究玉米/花生间作玉米根系分泌物对花生铁营养影响的机制[J]. 核农学报, 2004, 18(1): 43–46
Zuo Y M, Chen Q, Zhang F S. The mechanisms of root exudates of maize in improvement of iron nutrition of peanut in peanut/maize intercropping system by ^{14}C tracer technique[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2004, 18(1): 43–46

[11] 胡学玉, 李学垣, 谢振翅. 不同青菜品种吸锌能力差异及与根系分泌物的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 234–238
Hu X Y, Li X Y, Xie Z C. Differences of Zn uptake in various pakchoi cultivars and relationship between Zn uptake and root exudates[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 234–238

[12] 张锡洲, 李廷轩, 王永东. 植物生长环境与根系分泌物的关系[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 785–789
Zhang X Z, Li T X, Wang Y D. Relationship between growth environment and root exudates of plants: A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 785–789

[13] 郑诗樟, 肖青亮, 吴蔚东, 等. 丘陵红壤不同人工林型土壤微生物类群、酶活性与土壤理化性状关系的研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 57–61
Zheng S Z, Xiao Q L, Wu W D, et al. Relationship among microbial groups, enzyme activity and physico-chemical properties under different artificial forestry in hilly red soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 57–61

[14] Fisk L M, Barton L, Jones D L, et al. Root exudate carbon mitigates nitrogen loss in a semi-arid soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 380–389

[15] Lu Y F, Zhou Y R, Nakai S, et al. Stimulation of nitrogen removal in the rhizosphere of aquatic duckweed by root exudate components[J]. Planta, 2014, 239(3): 591–603

[16] 焦彬. 中国绿肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 27–28
Jiao B. Chinese Green Manure[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 27–28

[17] 杜成章, 张继君, 曾宪琪, 等. 不同播期对重庆蚕豆农艺性状及产量的影响[J]. 农业科技通迅, 2010(12): 86–89
Du C Z, Zhang J J, Zeng X Q, et al. Effects of different sowing dates on agronomic characters and yield and of broad bean in Chongqing[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2010(12): 86–89

[18] 董艳, 董坤, 郑毅, 等. 不同抗性蚕豆品种根系分泌物对枯萎病菌的化感作用及根系分泌物组分分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 292–299
Dong Y, Dong K, Zheng Y, et al. Allelopathic effects and components analysis of root exudates of faba bean cultivars with different degrees of resistance to *Fusarium oxysporum*[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 292–299

[19] 张钦, 陈正刚, 崔宏浩, 等. 蚕豆青秸翻压对玉米产量与土壤养分利用的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 632–636
Zhang Q, Chen Z G, Cui H H, et al. Effects of horse bean straw on maize yield and utilization of soil nutrients[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(2): 632–636

[20] 耿赛男. 豆科绿肥对旱坡地紫色土地力提升的机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015: 23–29
Geng S N. Research on the mechanism of legumes on the improvement of soil fertility in dry slope land of purple soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2015: 23–29

[21] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 742–747
Zhao P, Zheng Y, Tang L, et al. Effect of N supply and wheat/faba bean intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 742–747

[22] 李淑敏, 李隆, 张福锁. 蚕豆/玉米间作接种 AM 真菌与根瘤菌对其吸磷量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 136–139
Li S M, Li L, Zhang F S. Effect of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium on the P uptake in faba bean/maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 136–139

[23] 赵小亮, 刘新虎, 贺江舟, 等. 棉花根系分泌物对土壤速效养分和酶活性及微生物数量的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1426–1431
Zhao X L, Liu X H, He J Z, et al. Effects of cotton root exudates on available soil nutrition, enzyme activity and microorganism quantity[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(7): 1426–1431

[24] 孙磊, 陈兵林, 周治国. 麦棉套作 Bt 棉花根系分泌物对土壤速效养分及微生物的影响[J]. 棉花学报, 2007, 19(1): 18–22
Sun L, Chen B L, Zhou Z G. Effects of root exudates on available soil nutrition, Micro-organism quantity of Bt cotton in wheat-cotton intercropping system[J]. Cotton Science, 2007, 19(1): 18–22

[25] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 第 2 版. 北京: 农业出版社, 1996: 23–45
Nanjing Agricultural University. Soil Agro-chemistry Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Agriculture Press, 1996: 23–45

[26] 李阜棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 69–72
Li F L, Yu Z N, He S J. Agricultural Microbiology Experiment Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996: 69–72

[27] 赵金莉, 程春泉, 顾晓阳, 等. 入侵植物紫茉莉根系分泌物对土壤微生态环境的影响[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 95–99
Zhao J L, Cheng C Q, Gu X Y, et al. Effects of root exudates from mirabilis jalapa on soil microenvironment[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2014, 42(3): 95–99

[28] 李会娜, 刘万学, 戴莲, 等. 紫茎泽兰入侵对土壤微生物、酶活性及肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3964–3971
Li H N, Liu W X, Dai L, et al. Invasive impacts of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) on the changes of microbial community structure, enzyme activity and fertility in soil ecosystem[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3964–3971

[29] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27): 11192–11196

[30] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物–土壤–微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 298–310
Wu L K, Lin X M, Lin W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3): 298–310

[31] 兰忠明, 林新坚, 张伟光, 等. 缺磷对紫云英根系分泌物产生及难溶性磷活化的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1521–1531
Lan Z M, Lin X J, Zhang W G, et al. Effect of P deficiency on the emergence of *Astragalus* L. root exudates and mobilization of sparingly soluble phosphorus[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1521–1531

[32] 杨利宁, 敖特根·白银, 李秋凤, 等. 苜蓿根系分泌物对土壤中难溶性磷的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(8): 1216–1221
Yang L N, Aotegen B Y, Li Q F, et al. Effects of alfalfa root exudates on insoluble phosphorus in soil[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(8): 1216–1221

[33] 刘素萍, 杨之为. 根系分泌物[J]. 生态农业研究, 1998, 6(2): 36–38

Liu S P, Yang Z W. Plant root exudates[J]. Eco-Agriculture Research, 1998, 6(2): 36–38

[34] 张德闪, 王宇蕴, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际 pH 值的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 127–133
Zhang D S, Wang Y Y, Tang L, et al. Effects of wheat and faba bean intercropping on available phosphorus of red soils and its relationship with rhizosphere soil pH[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 127–133

[35] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4061–4069
Zhang A Q, He L Y, Zhao H E, et al. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soils and its readily available phosphate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4061–4069

[36] 占丽平, 丛日环, 李小坤, 等. 低分子量有机酸对红壤和黄褐土 K^+吸附动力学的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1147–1157
Zhan L P, Cong R H, Li X K, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on K^+ adsorption kinetics of red soil and yellow-cinnamon soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1147–1157

[37] 江长胜, 杨剑虹, 魏朝富, 等. 低分子量有机酸对紫色母岩中钾释放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 441–446
Jiang C S, Yang J H, Wei C F, et al. Effect of Low-molecular-weight organic acids on potassium release from purple rock[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 441–446

[38] 卢豪良, 严重玲. 秋茄[*Kandelia candel* (L)]根系分泌低分子量有机酸及其对重金属生物有效性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4173–4181
Lu H L, Yan C L. Exudation of low-molecular-weight-organic acids by *Kandelia candel* (L) Druce roots and implication on heavy metal bioavailability in mangrove sediments[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4173–4181

[39] 张福锁. 根分泌物及其在植物营养中的作用(综述)[J]. 北京农业大学学报, 1992, 18(4): 353–356
Zhang F S. Root exudates and their role in plant nutrition (a review)[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1992, 18(4): 353–356

[40] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere — A critical review[J]. Plant and Soil, 1998, 205(1): 25–44

[41] 孙波, 赵其国, 张桃林, 等. 土壤质量与持续环境 Ⅲ. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997, 29(5): 225–234
Sun B, Zhao Q G, Zhang T L, et al. Soil quality and sustainable environment (Ⅲ. The biological indexes for evaluation of soil quality)[J]. Soil, 1997, 29(5): 225–234

[42] 刘纯, 黄红娟, 张朝贤, 等. 假高粱根系分泌物对土壤细菌群落多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1124–1128
Liu C, Huang H J, Zhang C X, et al. The effects of root exudates from Johnsongrass on soil bacteria community diversity[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1124–1128

[43] 叶志毅, 屠振力. 桑树根的分泌物和根际微生物的研究[J]. 蚕业科学, 2005, 31(1): 18–21
Ye Z Y, Tu Z L. Study on the secretion and the rhizospheric microorganisms of mulberry roots[J]. Science of Sericulture, 2005, 31(1): 18–21

[44] 杨阳, 刘守伟, 潘凯, 等. 分蘖洋葱根系分泌物对黄瓜幼苗生长及根际土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1109–1117
Yang Y, Liu S W, Pan K, et al. Effects of Chinese onion's root exudates on cucumber seedlings growth and rhizosphere soil microorganisms[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1109–1117